

06;12

О механизмах токопрохождения в гетероструктурах n^+ -CdS- p -InP- p^+ -InP

© С.В. Слободчиков, Х.М. Салихов, Е.В. Руссу, Ю.Г. Малинин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 26 февраля 2000 г.

Исследованы механизмы токопереноса в температурном интервале 100–300 К. Установлено, что прямые токи определяются либо туннелированием через локальные центры (низкие температуры), либо рекомбинацией в слое пространственного заряда. Обратные токи связаны с туннелированием через локальные центры и с прямым межзонным туннелированием. Гетеропереходы имеют туннельный механизм пробоя.

На основе InP как материала, перспективного для создания фотопреобразователей, и в особенности солнечных элементов, был исследован соответствующий ряд диодных структур в виде гомо- и гетеропереходов. В гетеропереходах в качестве широкозонного компонента был использован, в частности, CdS [1,2]. В этих гетероструктурах были зафиксированы высокие коэффициенты преобразования солнечной энергии в электрическую. В настоящем сообщении приведены некоторые результаты исследования механизма токопереноса в гетероструктурах такого типа, которые могут представить интерес для оценки путей оптимизации основных фотоэлектрических характеристик.

Для создания гетероструктур использовался метод осаждения n^+ -CdS из твердого источника в атмосфере водорода. Процесс проводился в реакторе горизонтального типа при температуре осаждения (подложки) 650°C, при градиенте температуры между источником CdS и подложкой в 120°C. Слой n^+ -CdS имел концентрацию электронов $n^+ = (1-3) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ и подвижность 60–120 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$; толщина слоя 3–5 μm . Субстрат p -InP имел концентрацию дырок $p = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ и подвижность $\sim 250 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. Измерялись образцы прямоугольной формы с площадью $\sim 0.1 \text{ cm}^2$. Были выполнены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), их температурной зависимости, а также влияния магнитного поля на фототок гетероструктур при прямом и обратном смещении.

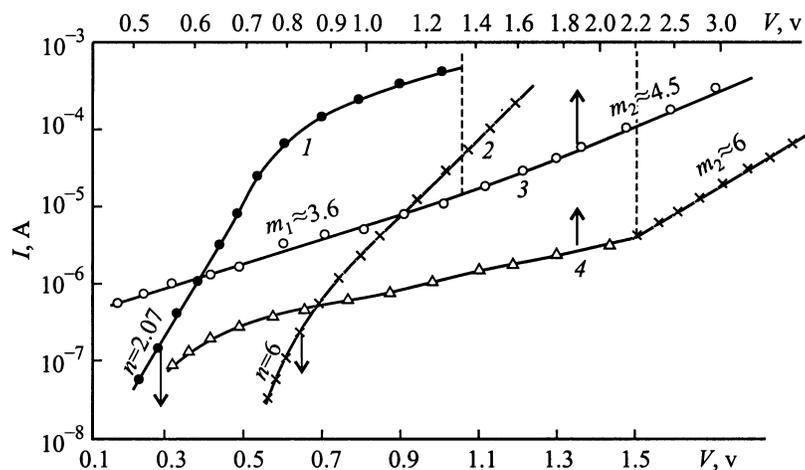


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики гетероструктуры n^+ -CdS- p -InP- p^+ -InP; прямые ветви — 1 ($T = 300$ К) и 2 ($T = 100$ К); обратные ветви — 3 ($T = 300$ К) и 4 ($T = 100$ К).

На рис. 1 представлены прямые и обратные ветви ВАХ образца n^+ -CdS- p -InP- p^+ -InP, снятые при $T = 300$ К (кривые 1, 3) и 100 К (кривые 2, 4). Температурная зависимость прямого тока (+ на p^+ -InP) в интервале 100–300 К дана на рис. 2. Изменение фототока при прямом и обратном смещении в зависимости от магнитного поля показано на рис. 3. В полулогарифмической зависимости прямого тока от напряжения (кривая 1) по соотношению $I \sim \exp(qV/nkT)$, коэффициент n при комнатной температуре равен 2.07, а при $T = 100$ К ~ 6 (кривая 2), причем в последнем случае при более высоких смещениях n существенно возрастает. Обратные ветви (кривые 3, 4) могут быть аппроксимированы соотношением $I \sim V^m$, причем они имеют два участка в зависимости от величины приложенного смещения. При $T = 300$ К и $V < 1.4$ В $m_1 = 3.6$, а при более высоких напряжениях $m_2 = 4, 5$; при $T = 100$ К и $V > 2.2$ В $m_2 \cong 6$.

В области низких температур наблюдается слабое изменение тока (рис. 2) и далее при $T > 150$ К рост тока с температурой идет с энергией активации $E_a \cong 0.08$ эВ.

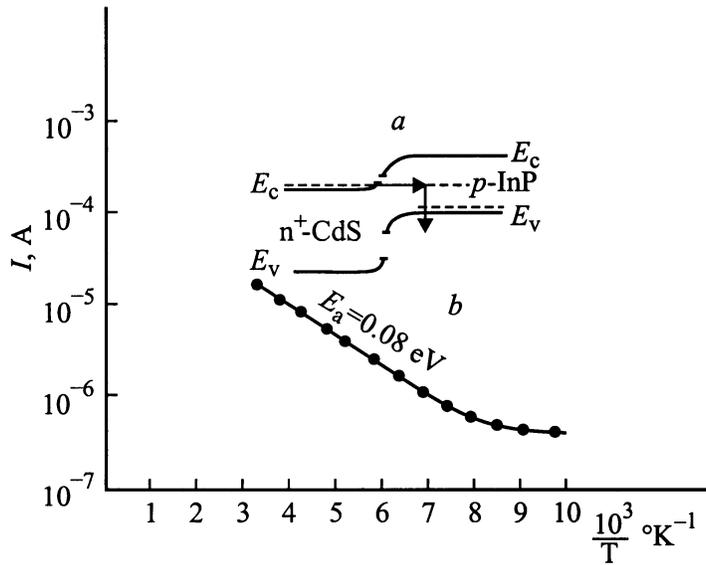


Рис. 2. Зонная схема (а) и температурная зависимость прямого тока гетероструктуры n^+ -CdS- p -InP- p^+ -InP (b).

Анализ этих экспериментальных данных приводит к заключению, что механизм токопереноса во всем температурном интервале не одинаков и должен включать несколько составляющих, вклад которых при низких и высоких температурах изменяется. Значения коэффициента $n \cong 2$ свидетельствуют о преобладании рекомбинационного тока области пространственного заряда (ОПЗ), а $n \gg 2$ — о решающем вкладе туннелирования. Общий ток тогда можно представить

$$I = I_{g-r} + I_{tun}. \quad (1)$$

В этой связи можно считать, что при низких температурах, где к тому же наблюдается слабое изменение тока, $I_{tun} \gg I_{g-r}$.

Так как p -InP не вырожден, а n^+ -CdS слабо вырожден, то прямое межзонное туннелирование невозможно. В то же время возможно не прямое туннелирование, а именно, когда электроны туннелируют с зоны проводимости n^+ -CdS на локальный уровень E_1 и оттуда переходят

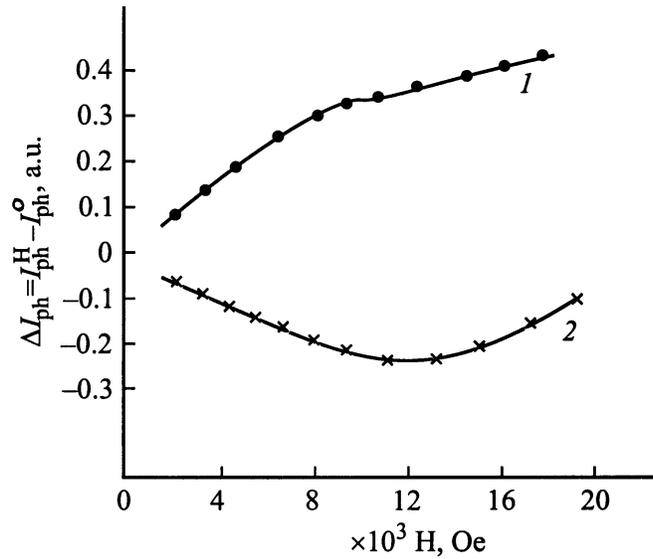


Рис. 3. Изменение фототока при прямом (кривая 1) и обратном (кривая 2) смещении в зависимости от магнитного поля в гетероструктуре n^+ -CdS- p -InP- p^+ -InP.

в валентную зону p -InP (рис. 2, *a*). В этом случае

$$I_{\text{тун}} \approx \alpha \cdot N_1 T_t, \quad (2)$$

где α — постоянная, N_1 — плотность локальных центров на уровне E_1 , а вероятность туннелирования

$$T_t = \exp\left(\frac{-4\sqrt{2}m^{*1/2}E^{*3/2}}{3q\hbar E}\right). \quad (3)$$

В (3) E^* — энергия туннелирования и E — электрическое поле. Очевидно, в гетероструктуре с заданными концентрациями легирующих примесей следует предполагать наличие резкого перехода. Подстановка в (2) выражения (3) с известным значением электрического поля в резком переходе и E^* в функции высоты барьера приводит к выражению

для туннельного тока [3]

$$I_{\text{тун}} \cong \alpha \cdot N_1 \exp[-\alpha_1(E_g - qV)], \quad (4)$$

определяющему поведение прямого тока при низких температурах. С ростом температуры механизм токопереноса начинает изменяться: преобладающий вклад начинает вносить генерационно-рекомбинационная компонента тока I_{g-r} . Величина этого тока определяется выражением

$$I_{g-r} = \frac{qn_i W}{\tau_r} \exp \frac{qV}{2kT}, \quad (5)$$

где n_i — собственная концентрация носителей тока, W — ширина слоя ОПЗ; этот слой, очевидно, находится целиком в p -InP, τ_r — время жизни носителей в этом слое. Поскольку температурный ход прямого тока при фиксированном смещении является активационным процессом с $E_a = 0.08$ eV (при $V = 0.6$ V), следует предположить, что время жизни носителей растет с температурой экспоненциально $\tau_r \sim \exp(-E_t/kT)$, где E_t — глубина рекомбинационного уровня, определяющего τ_r . Из (5) будем иметь

$$I_{g-r} \approx \exp \frac{q(2E_t - E_g + V)}{2kT}. \quad (6)$$

Для InP с $E_g = 1.34$ eV ($T=300$ K) и $E_a = 0.08$ eV глубина уровня $E_t \approx 0.45$ eV.

Обратный ток гетероструктуры обусловлен во всем температурном интервале преобладанием туннельного механизма токопереноса. При этом, если в первой области с меньшими значениями m , по-видимому, туннелирование с участием локальных центров преобладает, то во второй, с показателями m_2 и высокими смещениями имеет место межзонное туннелирование. В последнем случае в (3) E^* заменяется на E_g (для p -InP), если не учитывать разрыв зон. Экспоненциальная зависимость в последнем случае (при больших m_2) приближенно имеет вид степенной в двойном логарифмическом масштабе (кривые 3, 4). Этот участок, в сущности, отражает мягкий пробой гетероперехода. Механизм межзонного туннелирования подтверждается отрицательным температурным коэффициентом, т. е. напряжение пробоя уменьшается с ростом температуры. При $T = 100$ K начало пробоя при $V \sim 2.2$ V, а при $T = 300$ K — $V \sim 1.3$ V.

Исследование зависимости фототока от магнитного поля при прямом и обратном смещении (рис. 3) показывает, что в первом случае наблюдается рост фототока, достигающий 30% при $H = 16$ кОе, во втором, наоборот, его уменьшение, достигающее 15% при $H = 12$ кОе. Гетероструктура освещалась коротковолновым светом с $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, и генерация фотоносителей имела место в приповерхностном слое $p\text{-InP}$, включая ОПЗ. Можно предположить, что благодаря холловскому полю, созданному темновыми носителями тока в ОПЗ, формируется дрейфовый поток световых неосновных носителей, которые при прямом смещении отклоняются в магнитном поле к гетеропереходу, увеличивая фотоэдс, а при обратном — от гетероперехода и они рекомбинируют на глубоких центрах, включая и $E_t = 0.45$ эВ. Фототок в этом случае уменьшается. Характерно, что фототок структуры без смещения в магнитном поле не изменяется.

В заключение отметим, что полученные данные по механизму токопереноса в структурах $n^+\text{-CdS-p-InP-p}^+\text{-InP}$ следует учитывать при реализации возможных прикладных применений, в том числе в качестве фотопреобразователей.

Список литературы

- [1] *Ito K., Ohsawa T.* // Jap. J. Appl. Phys. 1975. V. 14. P. 1259.
- [2] *Wagner S., Shay J.L., Bachman K.J., Buchler E.* // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. P. 229.
- [3] *Chynoweth A.Q., Feldmann W.L., Loqan R.A.* // Phys. Rev. 1961. V. 121. P. 684.